

# Zwykły DfAM już nie wystarcza, czyli co nowego słyszeć w designie

Helena Dodziuk

Zacznijmy od terminologii: pojęcie wytwarzanie addytywne (*Additive Manufacturing*, AM) odnosi się najczęściej do zastosowań przemysłowych, podczas gdy druk 3D, 3DP, albo oznacza wszystkie nieprzemysłowe zastosowania tej technologii, np. w edukacji, albo całą dziedzinę wytwarzania addytywnego [1]. Poniżej będziemy stosować te pojęcia wymiennie, chociaż większość podawanych informacji dotyczy zastosowań przemysłowych. Międzynarodowy Komitet F42 ASTM (*American Society for Testing and Materials*) oraz ISO TC 261 dokonały standaryzacji terminów stosowanych w tej dziedzinie [2].

## 1. Wstęp

Szybkie prototypowanie (ang. *rapid prototyping*) było pierwszym etapem zastosowań 3DP. Następnym etapem było szybkie oprzyrządowanie (ang. *rapid tooling*). Obecnie jesteśmy na etapie szybkiego wytwarzania (ang. *rapid manufacturing*), czyli wprowadzania 3DP do produkcji średnio- i wielkoseryjnej. Nie jest to prosty proces. W najszerszym sensie obejmuje całościowe ujęcie procesu wytwarzania addytywnego od pomysłu, poprzez design, produkcję oraz dystrybucję i opis zachowania wydrukowanych w 3D części w trakcie ich użytkowania wraz ze stworzeniem pakietów oprogramowania uwzględniających wszystkie te etapy. Jednym z nich jest design czyli projektowanie.

Jedną z najważniejszych zalet 3DP jest możliwość wytwarzania bezpośrednio z modelu trójwymiarowego bardzo skomplikowanych kształtów, często niemożliwych (lub bardzo trudnych) do otrzymania metodami tradycyjnymi [1]. Przykładem jest tutaj kula z mniejszą wydrążoną kulą w środku oraz części z poruszającymi się względem siebie

fragmentami. Jednak ze względu na różnice w stosowanych technologiach 3DP i ich implementacjach funkcjonalne i geometryczne charakterystyki wydrukowanych w 3D części mogą się znacznie różnić [3], a ich wytwarzanie doprowadziło do zmiany podejścia do projektowania. Jak podkreśla Todd Grimm [4], na początku wydawało się, że „wytwarzanie addytywne oferuje nieograniczone możliwości projektowania bez ograniczeń procesowych”. Rzeczywiście 3DP otwiera możliwości całkowicie nowego myślenia o projektowaniu. Ale za wszystko się płaci: addytywne wytwarzanie również nakłada ograniczenia. Według Grimma, DfAM polega na maksymalizacji swobody designu wraz z minimalizacją takich czynników, jak czas, koszt i łatwość wytwarzania (ang. *manufacturability*). Inżynier chcący zastosować DfAM musi całkowicie zmienić swój sposób myślenia o projektowaniu. A to jest trudne. Pytanie: czy chce i potrafi zmienić swój sposób myślenia? Grimm konkluduje, że nawet jeśli nie opłaca się „przestawić” na DfAM w bieżącym projekcie, to należy zacząć się interesować tym podejściem do projektowania, ponieważ obok innych swoich zalet pozwala ono osiągnąć imponującą efektywność działania produktu.

Na początku części do wydrukowania w 3D projektowano, korzystając z tradycyjnych programów komputerowych CAD (*Computer Added Design*) [5]. Następnie, wraz z przejściem wytwarzania od krótkich do średnich i wielkich serii i lepszym rozumieniem technologii 3DP, przestało to wystarczać. Ten nowy sposób projektowania nazwano projektowaniem dla wytwarzania addytywnego (ang. *Design for Additive Manufacturing*, DfAM). Było to

projektowanie nacelowane na jak największą efektywność działania wydrukowanej w 3D części. Jak wskazano na blogu Markforge [6], DfAM oznacza projektowanie z uwzględnieniem wymagań funkcjonalnych wydrukowanej części. W porównaniu z innymi metodami wytwarzania technologie AM charakteryzują się ogromną dowolnością w projektowaniu, pozwalając na wykonanie bardzo skomplikowanych kształtów nie większym kosztem niż koszt wykonania prostych części. Jest istotne, że ogromne zalety DfAM na ogół warto wykorzystywać, gdy chcemy wykonywać średnie lub długie serie produkcyjne. Najczęściej nie warto poświęcać dużo czasu projektanta, aby wykonać pojedynczą część [7]. Ważnym ograniczeniem wytwarzania addytywnego jest fakt, że właściwości wydrukowanej w 3D części są anizotropowe, tzn. są one zależne od kierunku nakładania warstw. Np. wytrzymałość materiału w kierunku nakładanych warstw jest na ogół większa niż w kierunku prostopadłym do niego. W DfAM należy wziąć pod uwagę nie tylko możliwość wydrukowania tej części, lecz spełnienie stawianych jej wymagań funkcjonalnych. Jeśli chcemy wydrukować w 3D np. część samolotową, to może warto (ze względu na wysoki koszt często stosowanego w tej dziedzinie tytanu lub jego stopów) nie drukować jej jako litej struktury, a wbudować w nią „dziurę”, ewentualnie ze wzmacniającą ją siatką. Taka siatka może ewentualnie też mieć anizotropowy charakter, aby skompensować anizotropię wyjściowej struktury [8].

Mani ze współpracownikami podjęli próbę sformułowania reguł DfAM [3]. Podkreślili oni, że dzisiejsi designerzy muszą się skonfrontować z tym, że nie znają możliwości AM, ograniczeń

związanych z zastosowanym procesem produkcyjnym oraz ich wpływu na produkt końcowy [9–11]. W związku z dużą ilością różnych technologii AM problemem jest wybór optymalnej metody wytwarzania dla projektowanej części ze względu na jej na funkcję, rozmiar, wykończenie powierzchni lub tolerancje. Szeroka gama stosowanych w AM materiałów, obejmująca metale, plastiki oraz materiały kompozytowe i ceramiczne w postaci proszków, drutów, filamentu lub cieczy, nie ułatwia tego zadania. W szczególności problemy z powtarzalnością rozmiarów wydrukowanych części ograniczają szerokie używanie AM w zastosowaniach o dużej wartości lub o wysokich wymaganiach [12]. Mając na uwadze wymienione powyżej trudności, Mani i wsp. uznali za konieczność opracowanie podstawowych zasad, które pomogą ustalić współzależności między geometrią, zastosowanym materiałem, procesem produkcyjnym i strukturą oraz ułatwić przyszły rozwój systemów eksperckich i projektowania baz danych.

Angelle Erickson sformułowała na swoim blogu zasady dla DfAM [7]. Na początku stwierdziła ona, że 3DP obejmuje szereg technologii wytwarzania i projektowanie DfAM będzie zależało od tego, w jakiej technologii ma być wykonany projektowany przedmiot, ponieważ różne technologie wymagają różnych metod optymalizacji. W swoich uwagach Erickson ograniczyła się do technologii FDM [13] i PolyJet [14]. Wyróżnia ona dobrze i źle wdrożony AM. Ten ostatni właściwie niczym się nie różni od tradycyjnego designu, w którym menedżerowie narzucają ograniczenia budżetowe na inżynierię i projektowanie. Taki design wykonywany jest za pomocą tradycyjnego projektowania i częściowego wykorzystania celów projektu, a całość wienczy wykonanie techniką druku 3D z marginalnym wykorzystaniem jego specyfiki. Na końcu informacja zwrotna o udanym wydruku przekazywana jest na poziom inżynierii/designu. Natomiast w dobrze wdrożonym AM wzajemne zależności między trzema etapami (zarządzaniem, inżynierią i projektowaniem oraz wykonaniem) są dużo bardziej skomplikowane. Nie tylko zmieniają się

przesyłane z góry na dół „polecenia”, lecz również na każdym etapie towarzyszy im informacja zwrotna. Kierownictwo (zarządzanie) narzuca ograniczenia budżetowe oraz przekazuje warunki wynikające z zastosowania AM (Erickson nazywa te ograniczenia i warunki Inicjatywami AM), natomiast na etapie inżynierii/designu nie tylko wykorzystuje się projektowanie AM, lecz również uwzględnia cały projektowany proces. Dodatkowo całemu procesowi towarzyszy informacja zwrotna. Wykonawcy przekazują inżynierom/designerom, które części udało się, a których nie udało się prawidłowo wydrukować w 3D, oraz dodatkowe informacje o procesie drukowania. Z kolei inżynierowie/designerzy przekazują zarządowi swoje raporty wykorzystania i możliwości zastosowanych procedur oraz rekomendacje do wykorzystania w przyszłości. Należy zauważyć, że dobre lub złe zastosowanie DfAM daje na ogół różne wyniki: ta sama część zaprojektowana przy użyciu tego pierwszego podejścia różni się kształtem i jest na ogół lepsza od części zaprojektowanej z wykorzystaniem tradycyjnego designu, czyli złego zastosowania DfAM. A więc dobre zastosowanie DfAM daje, czasami bardzo istotne, oszczędności zużytego materiału. Warto podkreślić, że największe zyski z zastosowania DfAM uzyskuje się dla produkcji dużych serii, zaś najmniejsze przy szybkim prototypowaniu, przy czym wykorzystanie istotnych korzyści DfAM przy stosowaniu różnych technologii druku 3D wymaga stosowania różnych rodzajów optymalizacji. W rezultacie możemy uzyskać redukcję zasobów (surowców, kosztów, czasu drukowania czy też czasu dotyku [15]) oraz zwiększenie jakości (tj. wzrost wytrzymałości, estetyki czy też funkcjonalności produktu).

Jak wspomniano powyżej, DfAM polega na projektowaniu części zorientowanym na ich funkcjonalność [6]. Jednak coraz szersze zastosowania przemysłowe wymusiły rozszerzenie takiego podejścia i uwzględnienie różnorodności stosowanych technologii AM oraz używanych materiałów do drukowania w 3D. Alfaify i wsp. opublikowali niedawno pracę przeglądową podsumowującą poglądy

na nowoczesny DfAM [16]. Według tych autorów AM jest nowatorską metodą produkcji w zakresie projektowania, wytwarzania i dostarczania użytkownikom końcowym, zaś technologie AM zapewniają dużą elastyczność w projektowaniu złożonych komponentów, wysoce spersonalizowanych produktów, skutecznej minimalizacji odpadów, dużej różnorodności materiałów i zrównoważonych produktów. W swoim przeglądzie Alfaify i wsp. omówili zagadnienia związane z projektowaniem struktur komórkowych i podpór, a także z orientacją wytwarzanej części, jej złożonością, konsolidacją i montażem, jak również z materiałami do produkcji oraz trwałością produktu.

W ciągu ostatnich 30 lat nastąpił bezprecedensowy rozwój AM. Było to możliwe dzięki opracowaniu nowatorskich technologii AM (takich jak stereolitografia (SLA) [17], selektywne spiekanie laserowe (SLS) [17], osadzanie topionego materiału (ang. *Fused Deposition Modeling*, FDM) [18], różne odmiany druku trójwymiarowego (ang. *3 Dimensional Printing*, 3DP) [19], wytwarzanie obiektów laminowanych (ang. *Laminative Object Manufacturing*, LOM) [20] i laserowe osadzanie materiałów (ang. *Laser Material Deposition*, LMD) [21] i wiele innych), nowych materiałów do drukowania w 3D oraz bardzo różnorodnych zastosowań [1]. To wszystko, wraz ze zwiększoną dokładnością drukarek 3D, spowodowało, że AM może obecnie stać się nowym standardem wytwarzania, jeżeli uda się zintegrowanie zalet projektowania inżynierskiego i prototypów w końcowym funkcjonalnym produkcie [22]. Przypomnijmy, że unikalne zalety AM obejmują złożoność kształtu, materiału i funkcjonalności, złożoność hierarchiczną, masową kustomizację (ang. *customization*, czyli dopasowanie produkcji), personalizację produktu dla konkretnego użytkownika i decentralizację jego wytwarzania [23, 24]. Mają one umożliwić projektantom design wysokiej jakości części, które zapewniają funkcjonalność, właściwości mechaniczne i obniżkę kosztu, przy jednoczesnym wykorzystaniu zdolności produkcyjnych w systemach AM. Należy

jeszcze raz podkreślić, że technologie AM mają również swoje ograniczenia. Problemem jest drukowanie cienkich słupów i elementów wiszących [25], drobnych elementów, takich jak małe otwory, cienkie ścianki i szczeliny [26], konstrukcji nawisów [27, 28] oraz zamkniętych pustych przestrzeni, które uniemożliwiają usunięcie niestopionego materiału podpór [29]. Dodatkowo zniekształcenie termiczne [30], anizotropowe właściwości materiału [31], jak również koszt produktu i czas zużyty na jego wytworzenie [32] są istotnymi ograniczeniami AM, przy czym należy podkreślić, że ograniczenia te zależą od zastosowanej technologii AM [33].

Jak podkreślali wcześniej Thompson ze współpracownikami [33] oraz Todd Grimm [4], w przypadku DfAM projektanci różnią się znacznie swoją wiedzą na temat projektowania, narzędzi, zasad, procesów i metodologii. Szerokie wprowadzenie AM do przemysłu wraz z wykorzystaniem jego wszystkich zalet jest uzależnione od rozwoju i implementacji tej wiedzy.

## 2. Ogólna analiza DfAM przez Alfaify ze wsp. [16]

Wydaje się, że najbardziej kompleksowo podeszli do zmian w projektowaniu dla AM Alfaify ze współpracownikami [16]. Omówili oni zagadnienia związane z projektowaniem (a) struktur komórkowych i (b) podpór, (c) ich orientacją, (d) konsolidacją i montażem części oraz ich złożonością, a także z (e) materiałami oraz (f) trwałością produktu.

### a. Klasyfikacja designu dla AM

#### a1. Struktury komórkowe

Struktury komórkowe są to struktury porowate, którymi zainteresowano się ze względu na ich rolę przy wzmacnianiu trwałości mechanicznej [34, 35] w różnych aspektach, takich jak wysoki stosunek wytrzymałości do masy, wysoka zdolność przenoszenia ciepła, izolacyjność termiczna i pochłanianie energii. Składają się one z połączonych sieci stałych podpór, płytek lub małych komórek elementarnych (periodycznych lub przypadkowych), z którymi

mamy często do czynienia w przyrodzie (w szkielecie żywych komórek, gąbce, kości, korku, koralu, drewnie i wielu innych organizmach żywych). Można je podzielić na cztery grupy: gąbki, struktury plastra miodu, sieci i inne konstrukty [36, 37].

Niegdyś wytwarzano struktury sieciowe, wykorzystując skomplikowane i drogie metody. W związku z tym rzadko je wykorzystywano mimo zalet związanych z ich lekką konstrukcją. AM stwarza możliwość ich łatwego wytwarzania [38, 39]. Ostatnio ukazują się wiele prac na temat optymalizacji struktur komórkowych w DfAM (p. [16]), co więcej, prowadzi się również takie optymalizacje z narzuconymi celami, np. maksymalne współczynniki objętościowe, maksymalna rozszerzalność cieplna, ujemny współczynnik Poissona czy też złożone właściwości wielofunkcyjne. AM wykorzystano m.in. do wytworzenia sztywnych i bardzo lekkich struktur, struktur auksetycznych lub komórek dla materiałów akustycznych z ujemnym współczynnikiem refrakcji (p. [16]). DfAM struktur sieciowych wykorzystuje się do otrzymywania drogich materiałów funkcjonalnych o wyjątkowych właściwościach wykorzystywanych m.in. w lotnictwie i produkcji części samochodowych oraz przemyśle biomedycznym. Np. części samolotów muszą być lekkie i bardzo trwałe, robi się je więc z superstopów lub ceramiki odpornej na wysokie temperatury, jednak są one bardzo drogie. Stąd bardzo celowe jest wykorzystanie w tym wypadku struktur komórkowych. Np. pianka aluminiowa daje wyższą odporność na deformacje [40] i izotropowe właściwości mechaniczne; dlatego też w wysięgnikach ogonowych śmigłowców Boeinga stosuje się piankowe konstrukcje z aluminium i tytanu. Struktury komórkowe wykorzystuje się również w implantach i wielu innych zastosowaniach medycznych.

#### a2. Konsolidacja części i ich montaż

Konsolidacja części umożliwia zmniejszenie ich ilości oraz uproszczenie struktury produktu, na ogół pozwalając również na obniżenie jego kosztów oraz

wagi, a także ulepszając jego działanie (ang. *performance*) [41]. Taka strategia jest szeroko stosowana w przemyśle [42] i badaniach naukowych [43, 44]. GE, które było pionierem w wykorzystaniu konsolidacji części w druku 3D (pamiętny przykład wydrukowania dyszy silnika odrzutowego jako jednej części już w 2013 roku [45]), pokazało ostatnio wydrukowany w 3D silnik helikoptera składający się z 14 części zamiast 900 [46]. Dzięki projektowaniu dla montażu (ang. *Design for Assembly*, DfA) w AM uzyskuje się mniej złożoną strukturę produktów, minimalny czas przetwarzania (z uwzględnieniem czasu montażu i rozbudowy) [47].

W większości wcześniej prowadzonych prac nadrzędnym celem DfAM było jak najlepsze działanie (ang. *performance*) wydrukowanej w 3D części z jednoczesną obniżką kosztów, jej lepsza funkcjonalność z uwzględnieniem wytycznych dotyczących projektowania (ang. *design guidance*). Ponche i wsp. wprowadzili nową metodologię DfAM dotyczącą wymagań designu oraz specyfikacji wytwarzania i montażu [48]. Wcześniej Rosen wykorzystał komputerowy system DfAM do planowania procesu wytwarzania, wspomagania modelowania części i optymalizacji produkcji w celu znalezienia optymalnego czasu przetwarzania i montażu [49], zaś Thompson ze wsp. [33] przedstawili możliwości designu, jego zalety i swobody w zastosowaniu do drukowanych w 3D części.

Należy podkreślić, że konsolidacja części i montażu jest spektakularnym przykładem wykorzystania jednej z istotnych zalet druku 3D, a mianowicie możliwości drukowania bardzo skomplikowanych kształtów bez dodatkowych kosztów. Pozwala ona na znaczne obniżenie kosztów montażu (narzędzia do jego przeprowadzenia są niepotrzebne) oraz uproszczenie zarządzania produkcją [50].

#### a3. Podpory

Procesowi druku 3D towarzyszą siły wywierane na drukowaną część (np. siły grawitacyjne w przypadku nawisów, naprężenia termiczne lub siły generowane przez sam proces drukowania),

które wymuszają wprowadzenie podpór. Różne strategie stosuje się, aby zredukować lub wyeliminować wpływ tych sił na dokładność wydruków, ich wytrzymałość i funkcjonalność. Strategie te zależą od stosowanej technologii AM i użytych materiałów. Np. części wykonane z polimerów za pomocą metody SLS nie wymagają podpór, podczas gdy przy drukowaniu części SLS z metalu nie można ich pominąć. Podpory takie są konieczne dla zapewnienia lepszej jakości i dokładności wydruków, np. gdy proces drukowania generuje dużo ciepła, które podpora pomaga odprowadzić. Przy projektowaniu drukowanych podpór projektant musi uwzględnić czas ich drukowania, możliwości (ang. *removability*) i sposoby ich usunięcia (ang. *manner of removal*) oraz właściwości wydrukowanej części po usunięciu podpór. Problemowi podpór poświęcono wiele prac (p. prace cytowane w [16]).

#### a4. Złożoność części

Jak wspomniano, możliwość wytwarzania bardzo skomplikowanych obiektów bez generowania dodatkowych kosztów różni 3DP od metod tradycyjnych. Wykorzystują to artyści, rzemieślnicy i designerzy przemysłowi w jubilerstwie, meblarstwie i wielu innych dziedzinach. Jednym z ciekawszych przykładów wytwarzania skomplikowanych struktur wewnętrznych, które zwiększają funkcjonalność w wielu zastosowaniach, są np. zintegrowane kanały powietrzne [51], wewnętrzne mikrołopatki do okulistycznych urządzeń medycznych [52] czy też najszerzej stosowane konformalne kanały chłodzące [53, 54]. Szczególnie interesujące efekty daje wykorzystanie stopów z pamięcią kształtu w drukowanych w 3D do skomplikowanych struktur wewnętrznych [55]. Warto tutaj wspomnieć o obszernym przeglądzie drukowanych w 3D sensorów Khosravaniego i Reinicke [56].

#### a5. Materiały do drukowania

Materiały to obecnie bardzo istotny temat w dziedzinie druku 3D. W ostatnich latach w ich produkcję włączyły się wielkie koncerny chemiczne, np. BASF utworzył specjalną jednostkę 3D

Printing Solutions [57] zajmującą się produkcją materiałów do 3DP. Zaproponowano setki, jeśli nie tysiące materiałów do 3DP. Najpopularniejsze z nich (z pominięciem materiałów do biodruku [58]) są wymienione na stronie Formlabs [59]. Ngo ze wsp. podzielił materiały do drukowania na cztery grupy (w pracy [16] wymieniono ich błędnie pięć): metale i stopy, polimery i kompozyty, materiały ceramiczne oraz betony [60]. Niektóre materiały do drukowania są otrzymywane metodą 3DP. Polimery i materiały kompozytowe są najbardziej popularne w druku 3D. Rośnie znaczenie druku 3D w metalu.

#### a6. 3DP a zrównoważony rozwój (ang. *sustainability*)

Uwzględnianie zrównoważonego rozwoju w designie polega na tworzeniu produktów charakteryzujących się zoptymalizowanymi efektami ekonomicznymi i społecznymi, których negatywny wpływ na środowisko został zminimalizowany. Polega on m.in. na wytwarzaniu trwałych produktów, użyciu materiałów z recyklingu, stosowaniu wysoko wydajnych metod wytwarzania, wykluczeniu lub przynajmniej ograniczeniu stosowania niebezpiecznych materiałów i budowaniu głębokiego związku między produktem a konsumentem [16]. Tądese ze wsp. przedyskutowali wskaźniki wydajności ze względu na zrównoważony rozwój [61].

#### b. Dyskusja

##### b1. Wytyczne dla DfAM

Alfify i wsp. [16] podsumowali swoje rozważania, wprowadzając wytyczne (ang. *guidelines*) dla DfAM. Uważają oni, że DfAM jest wciąż w powijakach. Nadal brakuje zrozumienia, kiedy i jak projektować dla AM; brakuje również technologii, które wspierałyby DfAM. Medellin-Castillo i Zaragoza-Siqueiros omówili wytyczne projektowe dla DfAM przy wydrukach w technologii FDM, koncentrując się między innymi na wytwarzaniu, montażu, minimalizacji ryzyka, zrównoważonym rozwoju, standaryzacji, zapobieganiu korozji, recyklingu, trwałości, materiałach, konserwacji i minimalizacji kosztów [62].

Natomiast ogólne wytyczne dotyczą kątów nachylenia nawisów (ang. *inclination angles of overhang parts*) [33, 63], unikania użycia podpór [33, 64], jeżeli to jest tylko możliwe, stosowania wydrążonych części w celu zmniejszenia czasu wydruku i ilości zużytego materiału [65–67]. Dodatkowo zazębiane części mogą być używane w przypadku problemów związanych z montażem [68], zaś drukowanie w 3D dużych części może wymagać ich podziału na mniejsze fragmenty [64]. Oczywiście zmniejszenie ilości części prowadzi do redukcji czasu montażu [64, 65, 69].

Projektanci muszą nauczyć się pełnego wykorzystania zalet AM, aby uzyskać istotne rozwiązania przemysłowe z dużą wartością dodaną. Należy rozwijać teorie designu, metody oraz odpowiednie narzędzia, procesy i techniki [70], aby uwzględnić w tych systemach właściwe powiązanie geometrii i stosowanych materiałów z jakością. Należy również opracować odpowiednie narzędzia wdrożeniowe, aby wspierać projektowanie struktur komórkowych, heterogenicznych fragmentów, materiałów, rusztowań stosowanych w biodruku [71] itp. Jest istotne, żeby dla każdego projektowanego obiektu brać pod uwagę jego własne wymagania i właściwości.

##### b2. Narzędzia stosowane w DfAM

Wg Alfify i współpracowników [16] ważnym zadaniem na bieżącym etapie jest opracowanie narzędzi, teorii, metod oraz procesów i udostępnienie ich instytucjom edukacyjnym i przemysłowym. Zaproponowano szereg metod DfAM i opracowano oprogramowanie komputerowe obejmujące m.in. projektowanie oparte na modelowaniu geometrycznym [72], algorytmach ewolucyjnych [73, 74] oraz optymalizacji topologicznej [75] stosowane w reprezentacji projektu, jego analizie i optymalizacji [73]. Narzędzia te obejmują projektowanie wstępne Solidworks (Dassault Systèmes, Bellevue, WA, USA) [76], Fusion 360 (Autodesk, San Rafael, CA, USA) [77], and Rhino (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA, USA) [78], generację i projektowanie podpór przy wykorzystaniu bioinspirowanej metody projektowania

generatywnego [25] i szereg innych metod [27, 29–32, 79–82].

Główną konkluzją omawianej pracy Alfaify i wsp. [16] jest to, że projektanci muszą nauczyć się nowego, nowatorskiego myślenia, dążąc do stworzenia potężnych rozwiązań przemysłowych pozwalających na uzyskanie pełnych korzyści z zastosowania AM. W tym celu należy opracować teorie designu, jego metody i narzędzia oraz procesy i techniki wykorzystując współzależności między geometrią, materiałami oraz jakością drukowanych w 3D układów. Design dla AM musi być znacznie rozwinięty; nie może on być zorientowany jedynie na działanie drukowanej w 3D części, musi uwzględnić również wymagania procesu produkcyjnego (ang. *manufacturability*).

### 3. Wnioski końcowe


Reasumując, jesteśmy na trudnym etapie dostosowania 3DP do przemysłowych zastosowań średnio- i wielkoseryjnych, przy czym DfAM musi uwzględniać nie tylko funkcjonalność produktu, lecz również ograniczenia związane z jego wytwarzaniem (ang. *manufacturability*). Projektowanie części do wydrukowania w 3D musi być wbudowane w cały proces od pomysłu, poprzez wytwarzanie i kontrolę jakościową wydrukowanej w 3D części (ang. *end-to-end workflow*) [83,84], aż do kontrolowania jej jakości w trakcie używania.

### Literatura

- [1] DODZIUK H.: *Druk 3D/AM. Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze*. PWN, Warszawa 2019.
- [2] ASTM E2987/E2987M, 2016, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
- [3] MANI M., WITHERELL P., JEE H.: *Design rules for additive manufacturing: a categorization*, 2017/8/6, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, ASME.
- [4] GRIMM T., 16 III 2020, *Manufacturing Blog: Should You Design for Additive Manufacturing?*, <https://www.asme.org/topics-resources/content/manufacturing-blog-should-you-design-for-additive-manufacturing>, [dostęp 26 II 2022].
- [5] BERNSTEIN L., 11 paźdz. 2020, *What is computer-aided design and why it's important*, <https://www.procore.com/jobsite/what-is-computer-aided-design-cad-and-why-its-important/>, [dostęp 26 II 2022].
- [6] <https://markforged.com/resources/blog/design-for-additive-manufacturing-dfam> [dostęp 26 II 2022].
- [7] ERICKSON A., 26 Dec. 2018, *7 principles for design for additive manufacturing*, <https://www.cati.com/blog/2018/12/7-design-additive-manufacturing-dfam-principles/> [dostęp 5 II 2022].
- [8] *Design for additive manufacturing (DfAM) 3D printing strategies*, <https://markforged.com/resources/blog/design-for-additive-manufacturing-dfam> [dostęp 26 II 2022].
- [9] GIBSON I., GOENKA G., NARASIMHAN R., BHAT N., *Design rules for additive manufacture*, <https://research.utwente.nl/en/publications/design-rules-for-additive-manufacture> [dostęp 4 III 2022].
- [10] MEISEL N., WILLIAMS C. (October 12, 2015). *An Investigation of Key Design for Additive Manufacturing Constraints in Multimaterial Three-Dimensional Printing*. ASME. J. Mech. Des. November 2015; 137(11): 111406. <https://doi.org/10.1115/1.4030991>.
- [11] Ko H., MOON S.K., HWANG J.: *Design for additive manufacturing in customized products*. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16, 2369–2375 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0305-9>.
- [12] MANI M., LANE B., DONMEZ A., FENG S., MOYLAN S., AND FESPERMAN R., 2015, *Measurement Science Needs for Real-Time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes*, NIST IR 8036, National Institute of Standards and Technology.
- [13] GRAMES E., 9 IX 2020, *What is FDM 3D printing – simply explained*, <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> [dostęp 26 II 2022].
- [14] GREGURIC L., 29 VI 2019, *PolyJet – 3D printing technologies simply explained*, <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/> [dostęp 26 II 2022].
- [15] Czas dotyku, tj. czas, w którym pracuje się nad produktem, zwiększając jego wartość. Jest on na ogół dużo mniejszy niż całkowity czas produkcji, w który wliczony jest czas kolejowania, przesuwania itp. <http://www.sixsigmatrainingfree.com/touch-time.html> [dostęp 27 lutego 2022].
- [16] ALFAIFY A., SALEH M., ABDULLAH F.M., AL-AHMARI A.M., *Design for additive manufacturing: a systematic review*, Sustainability 2020, 12, 7936 (22 strony); doi:10.3390/su12197936, <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/7936/html>, dostęp 5 marca 2022.
- [17] BEAMAN J.J., BARLOW J.W., BOURELL D.L., CRAWFORD R.H., MARCUS H.L., MCALEA K.P.: *Solid freeform fabrication: A new direction in manufacturing*. Kluwer Acad. Publ. Norwell Ma 1997, 2061, 25–49.
- [18] COMB J., PRIEDEMAN W., TURLEY P.W.: *FDM® Technology process improvements*. In Proceedings of the 1994 International Solid Freeform Fabrication Symposium, UT Austin, TX, USA, 8–10 June 1994, pp. 42–49.
- [19] SACHS E.M., HAGGERTY J.S., CIMA M.J., WILLIAMS P.A.: *Three-Dimensional Printing Techniques*. Google Patents No. 5,204,055, 20 April 1993.
- [20] FEYGIN M., HSIEH B.: *Laminated object manufacturing (LOM): A simpler process*. In Proceedings of the 1991 International Solid Freeform Fabrication Symposium, UT Austin, TX, USA, 12–14 August 1991, pp. 123–130.
- [21] MAZUMDER J., SCHIERER A., CHOI J.: *Direct materials deposition: Designed macro and microstructure*. Mater. Res. Innov. 1999, 3, 118–131.
- [22] LAVERNE F., SEGONDS F., ANWER N., LE COQ M.: *DFAM in the design process: A proposal of classification to foster early design stages*. In Proceedings of the Confere 2014 Croatia, Sibenik, Croatia, 3–4 April 2014.
- [23] EDGAR J., TINT S.: *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Johns. Matthey Technol. Rev. 2015, 59, 193–198.

- [24] KO H., MOON S.K., HWANG J.: *Design for additive manufacturing in customized products*. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2015, 16, 2369–2375.
- [25] ZHANG K., CHENG G.: *Three-dimensional high resolution topology optimization considering additive manufacturing constraints*. Addit. Manuf. 2020, 35, 101224.
- [26] AMEEN W., AL-AHMARI A., ABDULHAMEED O.: *Design for metal additive manufacturing: An investigation of key design application on electron beam melting*. Int. J. Mech. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng. 2019, 13, 264–269.
- [27] ZHANG W., ZHOU L.: *Topology optimization of self-supporting structures with polygon features for additive manufacturing*. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2018, 334, 56–78.
- [28] ZHANG K., CHENG G., XU L.: *Topology optimization considering overhang constraint in additive manufacturing*. Comput. Struct. 2019, 212, 86–100.
- [29] XIONG Y., YAO S., ZHAO Z.-L., XIE Y.M.: *A new approach to eliminating enclosed voids in topology optimization for additive manufacturing*. Addit. Manuf. 2020, 32, 101006.
- [30] PENG H., GHASRI-KHOZANI M., GONG S., ATTARDO R., OSTIGUY P., ROGGE R.B., GATRELL B.A., BUDZINSKI J., TOMONTO C., NEIDIG J.: *Fast prediction of thermal distortion in metal powder bed fusion additive manufacturing: Part 2, a quasi-static thermo-mechanical model*. Addit. Manuf. 2018, 22, 869–882.
- [31] DAPOGNY C., ESTEVEZ R., FAURE A., MICHAILIDIS G.: *Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by additive manufacturing processes*. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2019, 344, 626–665.
- [32] SABISTON G., KIM I.Y.: *3D topology optimization for cost and time minimization in additive manufacturing*. Struct. Multidiscip. Optim. 2020, 61, 731–748.
- [33] THOMPSON M.K., MORONI G., VANEKER T., FADEL G., CAMPBELL R.I., GIBSON I., BERNARD A., SCHULZ J., GRAF P., AHUJA B.: *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. CIRP Ann. 2016, 65, 737–760.
- [34] GIBSON L.J., ASHBY M.F.: *Cellular Solids: Structure and Properties*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1999.
- [35] FIELDING G.A., BANDYOPADHYAY A., BOSE S.: *Effects of silica and zinc oxide doping on mechanical and biological properties of 3D printed tricalcium phosphate tissue engineering scaffolds*. Dent. Mater. 2012, 28, 113–122.
- [36] NAZIR A., ABATE K.M., KUMAR A., JENG J.-Y.: *A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019, 104, 3489–3510.
- [37] CHU C., GRAF G., ROSEN D.W.: *Design for additive manufacturing of cellular structures*. Comput. Aided Des. Appl. 2008, 5, 686–696.
- [38] VAYRE B., VIGNAT F., VILLENEUVE F.: *Designing for additive manufacturing*. Procedia CIRP 2012, 3, 632–637.
- [39] VAYRE B., VIGNAT F., VILLENEUVE F.: *Metallic additive manufacturing: State-of-the-art review and prospects*. Mech. Ind. 2012, 13, 89–96.
- [40] BANHART J.: *Progress in Materials Science*. Manuf. Characterisation Appl. Cell. Met. Met. Foam. 2001, 46, 559–632.
- [41] BOOTHROYD G.: *Product design for manufacture and assembly*. Comput. Aided Des. 1994, 26, 505–520.
- [42] DIETRICH D.M., CUDNEY E.: *Impact of integrative design on additive manufacturing quality*. Int. J. Rapid Manuf. 2011, 2, 121–131.
- [43] KUMKE M., WATSCHKE H., VIETOR T.: *A new methodological framework for design for additive manufacturing*. Virtual Phys. Prototyp. 2016, 11, 3–19.
- [44] YANG S., TALEKAR T., SULTHAN M.A., ZHAO Y.F.: *A generic sustainability assessment model towards consolidated parts fabricated by additive manufacturing process*. Procedia Manuf. 2017, 10, 831–844.
- [45] ZALEWSKI, 5 marca 2015, <https://fortune.com/2015/03/05/ge-engineering-3d-printing/> [dostęp 7 marca 2022].
- [46] KELLNER T.: *An epiphany of disruption: GE additive chief explains how 3D printing will upend manufacturing*. GE Rep. 2017, 13. Available online: <https://www.ge.com/reports/epiphany-disruption-ge-additive-chief-explains-3d-printing-will-upend-manufacturing/> [dostęp 7 marca 2022].
- [47] OH Y., BEHDAD S., ZHOU C.: *Part Separation Methods for Assembly Based Design in Additive Manufacturing*. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August 2017.
- [48] PONCHE R., KERBRAT O., MOGNOL P., HASCOET J.Y.: *A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process*. Robot. Comput. Integr. Manuf. 2014, 30, 389–398.
- [49] ROSEN D.W.: *Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures*. Comput. Aided Des. Appl. 2007, 4, 585–594.
- [50] LIU J.: *Guidelines for AM part consolidation*. Virtual Phys. Prototyp. 2016, 11, 133–141.
- [51] JIN T.: *Development of Concentric Semi-Automated Manipulator for Assembly Process*. Ph.D. Thesis, Universiti Putra Malaysia, Seri Kembangan, Selangor, Malaysia, 2018.
- [52] CHOI J.W., YAMASHITA M., SAKAKIBARA J., KAJI Y., OSHIKA T., WICKER R.B.: *Combined micro and macro additive manufacturing of a swirling flow coaxial phacoemulsifier sleeve with internal micro-vanes*. Biomed. Microdevices 2010, 12, 875–886.
- [53] ALTAFA K., RANI A.M.A., RAGHAVAN V.R.: *Prototype production and experimental analysis for circular and profiled conformal cooling channels in aluminium filled epoxy injection mould tools*. Rapid Prototyp. J. 2013, 19, 220–229.
- [54] GARCIA M., GARCIA-PANDO C., MARTO C.: *Conformal cooling in moulds with special geometry*. In Proceedings of the Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September–1 October 2011; pp. 409–412.
- [55] DAPINO M.J.: *Smart structure integration through ultrasonic additive manufacturing*. In Proceedings of the ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent

- Systems, Newport, RI, USA, 8–10 September 2014.
- [56] KHOSRAVANI M.R., REINICKE T.: *3D-printed sensors: Current progress and future challenges*. Sens. Actuators A Phys. 2020, 305, 11191.
- [57] [https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/group-companies/BASF\\_New-Business-GmbH/our-solutions/3d-printing.html](https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/group-companies/BASF_New-Business-GmbH/our-solutions/3d-printing.html) [dostęp 7 marca 2022].
- [58] VANAËI S., PARISI M.S., VANAËI S., SALEMIZADEHPARISI F., VANAËI H.R.: *An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application*, Engineered Regeneration, 2, 2021, 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.12.001>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266613812030013X> [dostęp 7 marca 2022].
- [59] <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-materials/> [dostęp 7 marca 2022].
- [60] NGO T.D., KASHANI A., IMBALZANO G., NGUYEN K.T., HUI D.: *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Compos. Part B Eng. 2018, 143, 172–196.
- [61] TADDESE G., DURIEUX S., DUC E.: *Sustainability performance indicators for additive manufacturing: A literature review based on product life cycle studies*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020, 107, 1–26.
- [62] MEDELLIN-CASTILLO H.I., ZARAGOZA-SIQUEIROS J.: *Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review*. Chin. J. Mech. Eng. 2019, 32, 53.
- [63] Manufacturing, S.D. Design for Additive Manufacturability: FDM Basics; Stratasys Direct Inc.: Valencia, CA, USA, 2016.
- [64] GIBSON I., ROSEN D.W., STUCKER B.: *Design for additive manufacturing*. In Additive Manufacturing Technologies; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 299–332.
- [65] YANG S., ZHAO Y.F.: *Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: A critical review*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015, 80, 327–342.
- [66] PHATAK A., PANDE S.: *Optimum strategies for hollowing and part orientation in additive manufacturing*. Int. J. Precis. Technol. 2016, 6, 61–77.
- [67] JIANG J., XU X., STRINGER J.: *Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing*. Robot. Comput. Integr. Manuf. 2019, 59, 317–325.
- [68] BAPTISTA R., PRAGANA J., BRAGANÇA I., SILVA C., ALVES L., MARTINS P.: *Joining aluminium profiles to composite sheets by additive manufacturing and forming*. J. Mater. Process. Technol. 2020, 279, 116587.
- [69] AMETA G., LIPMAN R., MOYLAN S., WITHERELL P.: *Investigating the role of geometric dimensioning and tolerancing in additive manufacturing*. J. Mech. Des. 2015, 137.
- [70] ABRAMOVICI M., GÖBEL J.C., SAVARINO P., GEBUS P.: *Towards smart product lifecycle management with an integrated reconfiguration management*. In Proceedings of the IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Seville, Spain, 10–12 July 2017; pp. 489–498.
- [71] PODSHIVALOV L., GOMES C.M., ZOCCA A., GUENSTER J., BAR-YOSEPH P., FISCHER A.: *Design, analysis and additive manufacturing of porous structures for biocompatible micro-scale scaffolds*. Procedia CIRP 2013, 5, 247–252.
- [72] TEDIA S., WILLIAMS C.B.: *Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling*. In Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, Austin, TX, USA, 8–10 August 2016; pp. 3–22.
- [73] HUANG J., CHEN Q., JIANG H., ZOU B., LI L., LIU J., YU H.: *A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing*. Virtual Phys. Prototyp. 2020, 15, 148–162.
- [74] GU G.X., WETTERMARK S., BUEHLER M.J.: *Algorithm-driven design of fracture resistant composite materials realized through additive manufacturing*. Addit. Manuf. 2017, 17, 47–54.
- [75] MADELEIN P., 23 września 2021, <https://www.3dnatives.com/en/topological-optimization-software-for-3d-printing-230920214/>, dostęp 10 marca 2022.
- [76] <https://www.3ds.com/products-services/solidworks/> [dostęp 10 marca 2022].
- [77] <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Modeling-3D-Printing-Autodesk-Design-Suites-2013> [dostęp 10 marca 2022].
- [78] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros\\_3D](https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D), dostęp 10 marca 2022.
- [79] DI ANGELO L., DI STEFANO P., DOLATNEZHADSOMARIN A., GUARDIANI E., KHORRAM E.: *A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: The application to FDM technology*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020, 108, 263–276.
- [80] SHEN H., YE X., XU G., ZHANG L., QIAN J., FU J.: *3D printing build orientation optimization for flexible support platform*. Rapid Prototyp. J. 2020, 26, 59–72.
- [81] CHENG L., LIANG X., BAI J., CHEN Q., LEMON J., TO A.: *On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing*. Addit. Manuf. 2019, 27, 290–304.
- [82] SHARMA G., GURUMOORTHY B.: *Modeling multiply connected heterogeneous objects using mixed-dimensional material reference features*. J. Comput. Des. Eng. 2019, 6, 337–347.
- [83] MOHIT A., 19 sierpnia 2021, <https://layers.app/blog/best-3d-printing-management-software-solutions/> [dostęp 12 marca 2022].
- [84] LAVI G., 14 Stycznia 2022, <https://all3dp.com/1/3d-printing-workflow-mes-software-buyers-guide/> [dostęp 12 marca 2022].

 Prof. Helena Dodziuk,  
IChF PAN, Warszawa  
e-mail: hdodziuk@gmail.com